



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR MODIS PARA MAPEAMENTO
DE ÁREAS IRRIGADAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DA
REGIÃO NORDESTE**

Andre Keiiti Ide

MONOGRAFIA

BRASÍLIA
2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Andre Keiiti Ide

**SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR MODIS PARA MAPEAMENTO
DE ÁREAS IRRIGADAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DA
REGIÃO NORDESTE**

**Monografia de especialização em
Geoprocessamento Ambiental
apresentada a banca examinadora
do Instituto de Geociências como
exigência para a obtenção do
título de especialista em
Geoprocessamento**

Aprovada em 16/12/16

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo M. de Mello Baptista (orientador)

Prof. Dr. Tati de Almeida

Eng. Ms. Adriana Panhol Bayma

Séries temporais do sensor Modis para mapeamento de áreas irrigadas em bacias hidrográficas da região Nordeste

Andre Keiiti Ide⁽¹⁾ e Gustavo Macedo de Mello Baptista⁽²⁾

⁽¹⁾Ministério da Integração Nacional (MI), Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Esplanada dos Ministérios, Bloco E, CEP 70.067-901, Brasília, DF, Brasil. E-mail: andre.ide@integracao.gov.br

⁽²⁾Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Caixa Postal 4465, CEP 70.910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: gmbaptista@unb.br

Resumo – Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do uso de séries temporais do índice de vegetação realçado (EVI) do sensor MODIS, filtradas pela técnica de logística dupla, no mapeamento de áreas irrigadas em bacias hidrográficas da região Nordeste. As séries temporais anuais, do período de 2006 a 2015, foram classificadas pelo algoritmo ISODATA, sendo gerado um mapa binário de áreas irrigadas e não irrigadas para cada ano. Sob condições de clima semiárido a classificação apresentou coeficiente de concordância Kappa médio de 0,66, subestimando a área irrigada em 7,6% em comparação com dados do censo agropecuário de 2006. Para regiões mais úmidas como o Agreste e Zona da Mata Nordestina a metodologia apresentou limitações em distinguir áreas irrigadas de vegetação natural, indicando a necessidade de realização de novos estudos. As séries temporais de EVI do sensor MODIS são aplicáveis ao mapeamento de áreas irrigadas na região Nordeste em condição de clima semiárido.

Termos para indexação: evi, índice de vegetação, irrigação, semiárido brasileiro, sensoriamento remoto.

Time series from Modis sensor for irrigated area mapping in hydrographic basins of the Northeast region

Abstract – This work aimed to evaluate the applicability of time series of enhanced vegetation index (EVI) from MODIS sensor, filtered by the double logistic technique, in irrigated area mapping in the Northeast region. The annual time series, from 2006 to 2015, were classified by the ISODATA algorithm, generating a binary map of irrigated and non-irrigated areas for each year. The methodology was shown to be applicable in semi-arid climate conditions, with

an average Kappa coefficient of 0.66 underestimating the irrigated area by 7.6% compared to the 2006 agricultural census. For more humid regions such as Agreste and Zona da Mata Nordestina the methodology showed limitations in distinguishing irrigated areas from natural vegetation, indicating the need for new studies. The EVI time series from MODIS sensor are applicable to the mapping of irrigated areas in the Northeast region in semi-arid climate conditions.

Index terms: evi, vegetation index, irrigation, brazilian semiarid, remote sensing.

Introdução

O monitoramento da agricultura irrigada, incluindo o levantamento de informações sobre sua distribuição espacial e temporal, é uma atividade essencial na gestão de recursos hídricos, possuindo também grande relevância na modelagem hidrológica de bacias hidrográficas, no planejamento agrícola, e na realização de análises econômicas e ambientais (Biggs et al., 2006; Ozdogan et al., 2010).

Apesar de sua importância e aplicabilidade em diversas atividades, na maior parte dos países há pouca disponibilidade de dados consistentes e atualizados sobre a real extensão e distribuição espacial da agricultura irrigada (Dheeravath et al., 2010). Em muitas ocasiões, informações quantitativas sobre áreas irrigadas são oriundas de dados censitários, os quais possuem elevado custo de obtenção e, em função do grande período de tempo com que normalmente são realizados, não são capazes de retratar a dinâmica interanual das áreas irrigadas (Dheeravath et al., 2010). No Brasil o censo agropecuário é realizado, em média, a cada 10 anos, sendo que o último levantamento foi realizado em 2006 com divulgação dos resultados em 2007.

O sensoriamento remoto oferece grandes oportunidades para o monitoramento sistemático da irrigação devido à disponibilidade contínua e gratuita de imagens da superfície terrestre. No entanto, estudos que utilizam sensoriamento remoto para mapeamento da

agricultura irrigada ainda são raros (Ozdogan et al., 2010). A nível mundial destacam-se as iniciativas do *International Water Management Institute* (IWMI), reportadas por Thenkabail et al. (2009), nas quais foram realizados mapeamentos globais de área irrigada com resolução espacial de 10 km. No Brasil destacam-se os trabalhos realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) no mapeamento de pivôs centrais, a nível nacional, utilizando imagens do satélite Landsat (Ana, 2016).

Segundo Ozdogan et al. (2010) o mapeamento de áreas irrigadas por meio de sensoriamento remoto é uma atividade complexa, pois consiste no mapeamento do uso do solo e não somente da sua cobertura. Além disso, é uma atividade que exige conhecimentos específicos sobre o manejo da área e sobre onde e quando os agricultores aplicam água para os cultivos. Em função destas dificuldades, na maior parte dos trabalhos de mapeamento de uso e ocupação do solo, as áreas irrigadas são frequentemente tratadas apenas como uma classe, não sendo o foco do estudo (Dheeravath et al., 2010).

Ozdogan et al. (2010) destacam também, que devido à resolução espacial da maior parte das imagens de sensoriamento remoto, a identificação de pequenas áreas irrigadas ainda é desafiadora. Segundo os mesmos autores, outra dificuldade ocorre na separação de cultivos irrigados de cultivos de sequeiro em regiões úmidas, em função da semelhança das assinaturas espectrais destes alvos. A presença de nuvens também é fator problemático em muitos locais, pois limitam a disponibilidade de imagens em frequência adequada. Em relação à frequência de imagens, necessária para o adequado mapeamento de áreas irrigadas, deve-se atentar para o fato de que as áreas agrícolas apresentam elevado dinamismo temporal. Desta forma, para uma adequada quantificação de toda a área irrigada ao longo de um ano ou safra, são necessárias imagens de datas consecutivas (Alexandridis et al., 2008; Gumma et al., 2011b).

Em função destas dificuldades, o uso de séries temporais de índices de vegetação,

oriundas de sensores de alta resolução temporal, tem se demonstrado como uma alternativa bem sucedida para o mapeamento de áreas irrigadas (Ozdogan et al., 2010), a exemplo de trabalhos realizados na Índia, Afeganistão, Gana e Estados Unidos (Biggs et al., 2006; Ozdogan & Gutman, 2008; Dheeravath et al., 2010; Gumma et al., 2011a; Pervez et al., 2014). As metodologias aplicadas nestes trabalhos se baseiam na diferença existente entre as curvas temporais de índices de vegetação de áreas irrigadas e não irrigadas (Figura 1). Neste contexto, destaca-se o uso de séries temporais de índices de vegetação do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites Terra e Aqua, o qual, em função de sua elevada resolução temporal (1 a 2 dias), e disponibilidade gratuita de longa série histórica, possui grande potencial no mapeamento de áreas agrícolas em escala regional (Pervez et al., 2014). Dentre os índices de vegetação disponíveis nos produtos pré-processados do sensor MODIS, destaca-se o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), o qual foi originalmente desenvolvido por Huete et al. (2002) e posteriormente adaptado por Jiang et al. (2008) para uso sem a utilização da banda azul. Este índice foi desenvolvido para ser aplicado especificamente aos dados do sensor MODIS, como alternativa para minimizar algumas limitações do NDVI, a exemplo da saturação em vegetações com elevado índice de área foliar e a influência dos efeitos do substrato do dossel e da atmosfera (Huete et al., 2002). O EVI calculado a partir de imagens de reflectância de superfície do MODIS é disponibilizado no produto MOD13Q1 na forma de uma composição dos melhores pixels de um período de 16 dias, reduzindo assim a probabilidade de utilização de pixels afetados pela presença de nuvens (Pervez, et al., 2014).

Apesar do EVI contido no produto MOD13Q1 ser calculado a partir de dados de reflectância de superfície, corrigidos atmosféricamente, as séries históricas apresentam ruídos decorrentes de perturbações atmosféricas e de imperfeições na calibração do sensor (Pervez, et al., 2014) (Figura 2). Desta forma, antes de sua utilização, é recomendável que os ruídos

sejam minimizados por meio de filtros de suavização, como aqueles implementados no programa TIMESAT desenvolvido por Jönson & Eklundh (2002).

Um aspecto importante no mapeamento do uso e ocupação do solo quando são utilizadas imagens de sensores de média resolução espacial, é a ocorrência de grande heterogeneidade na escala subpixel. As imagens de EVI do produto MOD13Q1 do MODIS são disponibilizadas com resolução espacial de 250 m, de modo que cada pixel abrange uma área de 6,25 ha. Desta forma, é natural que um pixel que tenha sido classificado como “área irrigada” possua certa fração ocupada por outros usos do solo, como vegetação natural, estradas, edificações, dentre outros. Assim, para que não haja sobrestimativa no cálculo de área irrigada a partir deste tipo de mapeamento é essencial que se realize a estimativa da fração de área sub-pixel efetivamente irrigada (Thenkabail et al., 2007).

Considerando estas particularidades e desafios, bem como a potencialidade do uso de séries temporais de índices de vegetação no mapeamento de áreas irrigadas, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de séries temporais de EVI do sensor MODIS no mapeamento de áreas irrigadas em bacias hidrográficas da região Nordeste, no período de 2006 a 2015.

Material e Métodos

Para este estudo foi considerado como área irrigada a área agrícola que recebe aplicação parcial ou total de água no solo, com o objetivo de suprir a demanda de hídrica dos cultivos. Áreas que são cultivadas com mais de uma safra ao longo do ano foram consideradas uma única vez.

A área de estudo está integralmente localizada na região Nordeste, delimitada pelas latitudes 4° 18' 0" e 9° 24' 0" S e longitudes 34° 42' 0" e 41° 00' 0" W, abrangendo todo o território das bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe, Apodi, Piranhas, Paraíba, Ipojuca, Moxotó, Pajeú, Terra Nova, Brígida e sub bacias do Rio São Francisco. Estas bacias estão

associadas ao Projeto de Integração do Rio São Francisco (Transposição), podendo receber água dos sistemas de canais dos Eixos Norte e Leste (Figura 3). Segundo a classificação de Köppen, os climas predominantes na região são o BSh, semiárido, e As, tropical com verão seco (Alvares, 2014). A precipitação média sobre esta região como um todo é de 750 mm, mas pode variar entre 500 e 2000 mm, dependendo da localidade. As precipitações se concentram nos meses de janeiro a julho, apresentando distribuição irregular e grande variabilidade interanual (Montenegro et al., 2010; Marengo & Bernasconi, 2015).

Foram utilizados dados de EVI, com resolução espacial de 250 m, contidos no produto MOD13Q1, coleção 5, do sensor MODIS, obtidos do banco de dados da agência USGS (United States Geological Survey). Para abranger toda a área de estudo, foram obtidos os *tiles* h13v09 e h14v09, do período de janeiro de 2006 a dezembro de 2015, totalizando 460 imagens. Os dados originalmente obtidos com a projeção sinusoidal e no formato *Hierarchical Data Format* (HDF) foram mosaicados, recortados para a área de estudo e convertidos para o sistema de coordenadas geográficas por meio do algoritmo *MODIS Reprojection Tool* (MRT).

Visando minimizar o efeito da presença de ruídos, a série temporal foi suavizada por meio do ajuste à função logística dupla (Borges et al., 2014), com o uso do programa Timesat (Jönson & Eklundh, 2002). Os parâmetros utilizados para o ajuste à função logística dupla foram: série temporal = 10 anos; 23 imagens por ano; limite de amplitude (cut-off) = 0; spike method = 3; adaptação = 3; e número de interações = 1.

A série temporal suavizada foi subdividida em períodos anuais, contendo 23 imagens para cada ano do período de 2006 a 2015. Cada uma destas séries temporais foi classificada por meio do algoritmo *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* (ISODATA) implementado no software ENVI versão 5.1 (Exelis Visual Information Solutions, Boulder, CO, EUA). Foram geradas 40 classes, com no máximo 15 iterações, e limiar de convergência

de 5%.

Áreas cobertas com vegetação natural, principalmente aquelas localizadas no alto de serras e chapadas, as quais podem se confundir com áreas irrigadas, foram identificadas por meio de mapeamentos existentes da vegetação, modelo digital de elevação e imagens Landsat, sendo posteriormente mascaradas e excluídas do processo de classificação.

Após a classificação, as classes correspondentes às áreas irrigadas foram identificadas a partir da inspeção visual em pontos de controle localizados nos principais perímetros públicos de irrigação da região, tendo como apoio, a interpretação visual de imagens de maior resolução espacial. Foram utilizadas imagens TM Landsat para os anos de 2006 a 2011, imagens OLI Landsat para os anos de 2013 a 2015, e para o ano de 2012, em função da ausência de imagens Landsat, foram utilizadas imagens do sensor LISS3 do satélite Resoucesat.

A área irrigada, calculada a partir da classificação das imagens do MODIS, foi multiplicada por uma fração de área irrigada, conforme equação a seguir:

$$AI = f \times A_{modis}$$

em que: AI é a área irrigada líquida; f é a fração de área irrigada; e Amodis é a área irrigada calculada a partir da imagem MODIS classificada.

Para o cálculo da fração de área irrigada (f) foram geradas 20 janelas de 10x10 Km sobre áreas já classificadas como irrigadas. Dentro destas janelas, realizou-se a classificação de imagens com maior resolução espacial (Landsat e Resourcesat) para cada ano estudado. As áreas irrigadas dentro de cada janela calculada com a classificação das imagens de maior resolução espacial foram divididas pela área irrigada calculada pela imagem do MODIS, obtendo-se assim um valor de f para cada ano estudado (Biggs et al., 2006), conforme equação a seguir:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_h}{A_{modis}}}{N}$$

em que: A_h é a área irrigada calculada a partir da classificação de imagens de maior resolução espacial (Landsat e Resourcesat); N é o número de janelas de 10x10 Km; e i é a i -ésima janela.

Para a avaliação da qualidade da classificação foi construída uma matriz de confusão para cada ano avaliado, considerando as classes “irrigada” e “não irrigada”, seguida do cálculo do índice de exatidão global, coeficiente de concordância Kappa, erros de omissão e comissão. Foi adotado o esquema de amostragem estratificada, sendo que 50% dos pixels foram amostrados na classe irrigada e 50% na classe não irrigada. O tamanho da amostra foi de 288 pixels para cada ano, dimensionada em conformidade com a fórmula da distribuição binomial, adotando-se intervalo de confiança de 95% de probabilidade, exatidão global esperada de 75% e erro de amostragem permissível de 5% (Costa & Brites, 2004). Como referência foi utilizado o resultado de interpretação visual de imagens Landsat ou Resourcesat em cada pixel amostrado. Nos casos em que apenas uma fração do pixel amostrado possui área irrigada, este foi considerado como “irrigado”. A Figura 4 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada.

Resultados e Discussão

A classificação das séries temporais resultou em um mapa binário para cada ano estudado, indicando a localização e distribuição espacial das áreas irrigadas (Figura 5). Além das áreas irrigadas concentradas em perímetros públicos de irrigação, constatou-se a presença de pequenas áreas irrigadas distribuídas ao longo dos cursos hídricos. Como exceção a este padrão, destacam-se áreas irrigadas no Oeste do Estado do Rio Grande do Norte, compostas por pequenos talhões espacialmente dispersos, as quais têm como fonte hídrica água

subterrânea.

A metodologia aplicada permitiu a distinção entre áreas irrigadas e não irrigadas na porção semiárida da área de estudo, resultando em mapas com exatidão global variando de 0,79 a 0,89 e coeficiente Kappa variando de 0,58 a 0,78 (Tabela 1). Segundo a classificação proposta por Landis & Koch (1977), o coeficiente Kappa entre 0,41 e 0,60 indica moderada concordância entre os dados produzidos e a referência, e valores entre 0,61 e 0,80 indica substancial concordância.

Para as porções mais úmidas da área de estudo, como as regiões do Agreste e Zona da Mata Nordestina, a metodologia adotada se demonstrou ineficaz em distinguir agricultura irrigada de outros usos do solo. Nestas regiões, em função das maiores e mais distribuídas precipitações, a vegetação natural, ou mesmo áreas agrícolas não irrigadas apresentaram curvas temporais de EVI com certo grau de semelhança às áreas irrigadas, de modo que a classificação adotada não foi capaz de distinguir as áreas irrigadas de outras vegetações. Desta forma, as bacias hidrográficas dos Rios Paraíba e Ipojuca, as quais possuem a maior parte de seus territórios nestas zonas climáticas, foram excluídas da análise de precisão e quantificação de área irrigada apresentadas neste artigo.

A dificuldade em mapear áreas irrigadas em regiões úmidas por meio de imagens de sensoriamento remoto é frequentemente relatada na literatura (Ozdogan et al., 2010; Zhu et al., 2014), não havendo uma metodologia comprovadamente eficaz que possa ser aplicada em qualquer condição agrícola e climática.

Para a amenização do problema oriundo das diferenças de regimes pluviométricos, alguns autores propõe a segmentação da área de estudo em regiões climaticamente semelhantes, a exemplo de Dheeravath et al. (2010) que, ao mapear áreas irrigadas na Índia, em escala nacional, subdividiu o território em seis zonas climaticamente semelhantes, realizando a classificação de séries temporais de NDVI, em separado, para cada uma destas

regiões. Esta é uma alternativa que pode ser estudada futuramente para o mapeamento da agricultura irrigada na região Nordeste, uma função da ocorrência de condições climáticas variadas.

Para o aperfeiçoamento da classificação de áreas irrigadas na região do Agreste e Zona da Mata, outras metodologias podem ser testadas, a exemplo de classificações que incorporem bandas de outros comprimentos de onda, bem como outros dados, como precipitação e dados censitários (Ozdogan & Gutman, 2008; Dheeravath et al., 2010; Zhu et al., 2014). Outros algoritmos de classificação também podem ser avaliados, como árvores de decisão e *Spectral Matching Techniques* (Thenkabail et al., 2007; Pervez et al., 2014). Warren et al. (2014) apontam ainda a possibilidade de identificação de áreas irrigadas a partir da realização de balanço hídrico simplificado, derivado de dados de sensoriamento remoto, onde são consideradas irrigadas as áreas em que as saídas por evapotranspiração são superiores às entradas por precipitação.

Os erros de comissão (áreas não irrigadas classificadas como irrigadas) foram superiores aos erros de omissão para todos os anos avaliados. Este resultado se deve, principalmente, pela existência de áreas de vegetação natural e áreas agrícolas não irrigadas que apresentam curvas temporais de EVI semelhantes às áreas irrigadas, e que foram erroneamente classificadas como irrigada. Apesar da maior parte das áreas com vegetação natural com bom estado de preservação, sobretudo aquelas localizadas no alto de serras e chapadas, terem sido mascaradas e excluídas da classificação, algumas áreas ainda implicaram em erros de comissão, principalmente, nas porções mais chuvosas da área de estudo, como na região da Chapada do Araripe e nas proximidades do litoral norte dos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Em estudos futuros, o aperfeiçoamento da construção de máscaras, tendo como base levantamentos mais precisos de vegetação, ou mesmo o levantamento preliminar de áreas agrícolas, podem contribuir para a redução dos

erros de comissão.

Áreas irrigadas espacialmente concentradas, como aquelas que ocorrem em perímetros públicos de irrigação e ao longo de cursos hídricos, foram identificadas com maior facilidade. A identificação de áreas irrigadas pequenas e fragmentadas, especialmente aquelas inseridas em paisagens heterogêneas, se mostrou mais desafiadora. Esta dificuldade já era esperada e segundo Velpuri et al. (2009) se deve à baixa resolução espacial das imagens utilizadas. Para um mapeamento mais preciso destas pequenas áreas, seria necessário o uso de imagens de melhor resolução espacial. No entanto, o uso de imagens de alta resolução espacial para o mapeamento de áreas irrigadas em escala regional é limitante em função da baixa disponibilidade de imagens livre de nuvens, o que implica em dificuldades de captura de toda a dinâmica temporal típica dos cultivos anuais irrigados. Como alternativa, Gumma et al. (2011a) propuseram uma metodologia baseada em fusão de imagens Landsat com séries temporais do MODIS para o mapeamento de pequenas áreas irrigadas em Gana, obtendo resultados satisfatórios (exatidão de 67 a 93%).

A área irrigada nas bacias estudadas variou de 111.094 a 206.941 ha ao longo do período de 2006 a 2015, com média de 157.206 ha. A Tabela 2 apresenta a área irrigada calculada para cada ano em cada uma das bacias estudadas. Para o ano de 2015 foi identificada redução na área irrigada de aproximadamente 30% em relação à média do período. Apesar da classificação do ano de 2015 ter apresentado os menores erros de omissão e comissão, pode-se inferir que esta redução se deve a erros no mapeamento, e também à redução na oferta hídrica da região. A partir do ano de 2013, a Agência Nacional de Águas passou a adotar ações regulatórias emergenciais em função da baixa disponibilidade hídrica em algumas das bacias estudadas, como restrições e até suspensões de captações de água para irrigação (ANA, 2015), o que pode ter influenciado na redução da área irrigada.

Segundo dados do Censo Agropecuário IBGE a área irrigada total nas bacias

estudadas era de 131.652 ha no ano de 2006, sendo, portanto, 7,6% maior do que a área calculada neste estudo. Esta subestimativa pode ser resultante da não identificação de áreas irrigadas pequenas e fragmentadas, e de incertezas na estimativa da fração de área irrigada na escala sub-pixel (Figura 6).

Conclusões

1. A classificação de séries temporais de EVI do sensor MODIS se demonstra aplicável ao mapeamento de áreas irrigadas na porção semiárida de bacias hidrográficas da região Nordeste.
2. Na condição de clima semiárido a metodologia aplicada subestima a área irrigada em comparação com dados do censo agropecuário.
3. A metodologia aplicada não é eficaz no mapeamento de áreas irrigadas na região do Agreste e Zona da Mata.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2014**. Brasília, p.434, 2015. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf>. Acesso em: 06 de outubro, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – 2014**. Brasília, 33p, 2016. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/impressa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 11 de outubro, 2016.
- ALEXANDRIDIS, T. K.; ZALIDIS, G. C.; SILLEOS, N. G. Mapping irrigated area in Mediterranean basins using low cost satellite earth observation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.64, p.93-103, 2008. DOI:10.1016/j.compag.2008.04.001
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. S.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0507
- BIGGS, T. W.; THENKABAIL, P. S.; GUMMA, M. K.; SCOTT, C. A.; PARTHASARADHI, G. R.; TURRAL, H. N. Irrigated area mapping in heterogeneous landscapes with MODIS time series, ground truth and census data, Krishna Basin, India. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.19, p.4245-4266, 2006. DOI:10.1080/01431160600851801

BORGES, E. F.; SANO, E. E.; MEDRADO, E. Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.8, n.1, p.083580-1-083580-21, 2014. DOI:10.1117/1.JRS.8.083580

COSTA, T. C. C. da; BRITES, R. S. A influência do tamanho da amostra de referência na exatidão de classificação de imagens de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.56, n.2, p.151-155, 2004.

DHEERAVATH, V.; THENKABAIL, P. S.; CHANDRAKANTHA, G.; NOOJIPADY, P.; REDDY, G. P. O.; BIRADAR, C. M.; GUMMA, M. K.; VELPURI, M. Irrigated areas of India derived using MODIS 500 m time series for the years 2001-2003. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.65, p.42-59, 2010. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2009.08.004

GUMMA, M. K.; THENKABAIL, P. S.; HIDETO, F.; NELSON, A.; DHEERAVATH, V.; BUSIA, D.; RALA, A. Mapping irrigated areas of Ghana using fusion of 30 m and 250 m resolution remote-sensing data. **Remote Sensing**, v.3, p.816-835, 2011a. DOI:10.3390/rs3040816

GUMMA, M. K.; THENKABAIL, P. S.; NELSON, A. Mapping Irrigated Areas Using MODIS 250 Meter Time-Series Data: A Study on Krishna River Basin (India). **Water**, v.3, p.113-131, 2011b. DOI:10.3390/w3010113

HUETE A.; DIDAN K.; MIURA T.; RODRIGUEZ P.; GAO X.; FERREIRA L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00096-2

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Apresenta os resultados do Censo Agropecuário realizado no ano de 2006. disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006>>. Acesso em: 15 de outubro, 2016.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN K.; MIURA T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3833-3845, 2008. DOI:10.1016/J.RSE.2008.06.006

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n.8, p.1824-1832, 2002. DOI:10.1109/TGRS.2002.802519

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977. DOI:10.2307/2529310

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v.129, p.103-115, 2015. DOI:10.1007/S10584-014-1310-1

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. **Irrigation Science**, v.28, p.301-316, 2010. DOI:10.1007/S00271-009-0191-Y

OZDOGAN, M.; GUTMAN, G. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: an application example in the continental US. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3520-3537, 2008. DOI:10.1016/j.rse.2008.04.010

OZDOGAN, M.; YANG, Y.; ALLEZ, G.; CERVANTES, C. Remote sensing of irrigated agriculture: opportunities and challenges. **Remote Sensing**, v.2, p.2274-2304, 2010. DOI:10.3390/rs2092274

PERVEZ, M. S.; BUDDE, M.; ROWLAND, J. Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v.149, p.155-165, 2014. DOI:10.1016/j.rse.2014.04.008

THENKABAIL, P. S.; BIRADAR, C. M.; NOOJIPADY, P.; CAI, X.; DHEERAVATH, V.; LI, Y.; VELPURI, M.; GUMMA, M.; PANDEY, S. Sub-pixel area calculation methods for estimating irrigated areas. **Sensors**, v.7, p.2519-2538, 2007.

THENKABAIL, P. S.; BIRADAR, C. M.; NOOJIPADY, P.; DHEERAVATH, V.; LI, Y.; VELPURI, M.; GUMMA, M.; GANGALAKUNTA, O. R. P.; TURRALS, H.; CAI, X.; VITHANAGE, J.; SCHULL, M. A.; DUTTA, R. Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium. **International Journal of Remote Sensing**, v.30, n.14, p.3679-3733, 2009. DOI:10.1080/01431160802698919

VELPURI, N. M.; THENKABAIL, M. K.; GUMMA, M. K.; BIRADAR, C.; DHEERAVATH, V.; NOOJIPADY, P.; YUANJIE, L. Influence of resolution in irrigated area mapping and area estimation. **Photogrammetric Engineering & Remote Science**, v.73, n.12, p.1833-1395, 2009. DOI:10.14358/PERS.75.12.1383

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. de C.; RODRIGUES, L. R.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.1, p.65-82, 2014.

ZHU, X.; ZHU, W.; ZHANG, J.; PAN, Y. Mapping irrigated areas in China from remote sensing and statistical data. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.7, p.4490-4504, 2014. DOI:10.1109/JSTARS.2013.2296899

Tabelas e Figuras

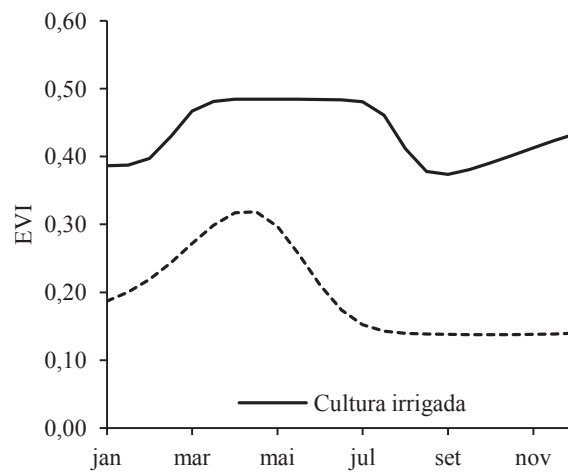


Figura 1. Curvas temporais de EVI do sensor MODIS de uma área irrigada e de área coberta com vegetação natural na Caatinga.

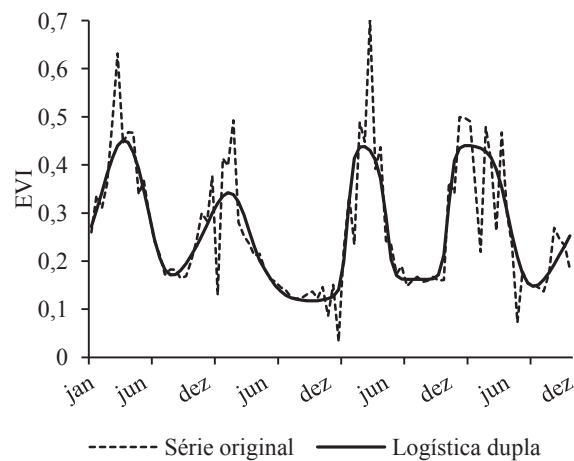


Figura 2. Série temporal de EVI do sensor MODIS, em área de vegetação natural na Caatinga, mostrando a presença de ruídos na série original e sua versão suavizada por meio do ajuste à função logística dupla.

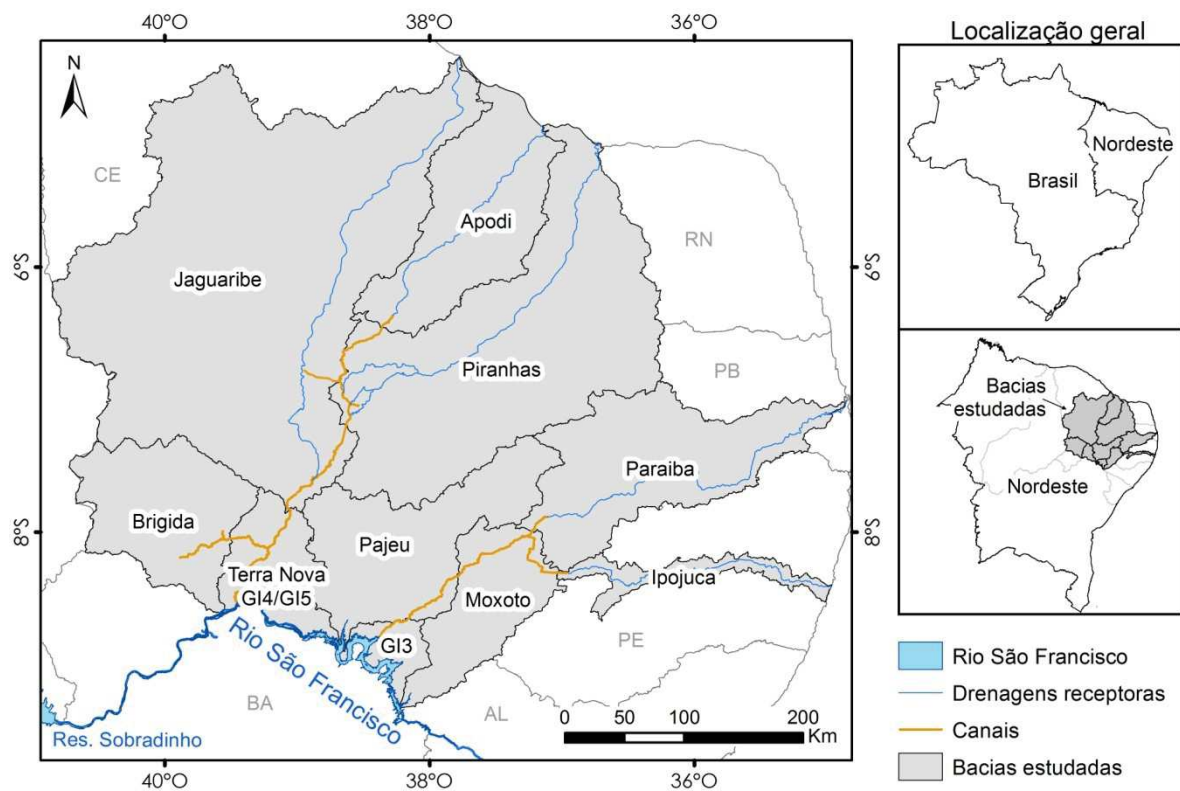


Figura 3. Mapa da área de estudo indicando a localização das bacias hidrográficas estudadas, dos canais do Projeto de Integração do Rio São Francisco e das principais drenagens receptoras.

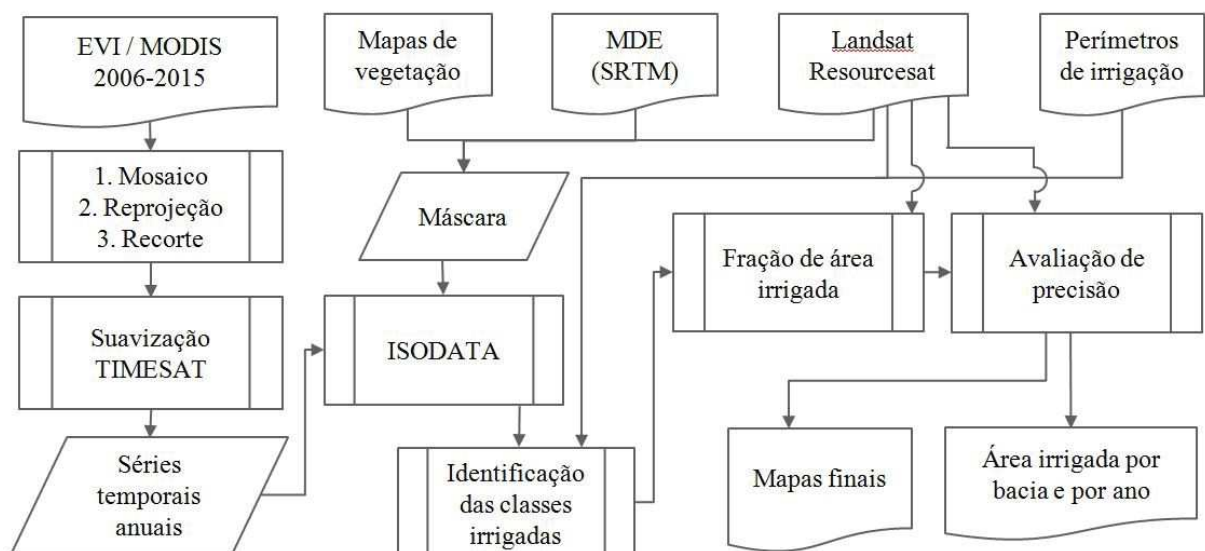


Figura 4. Fluxograma da metodologia aplicada para o mapeamento de áreas irrigadas utilizando séries temporais de EVI do sensor MODIS.

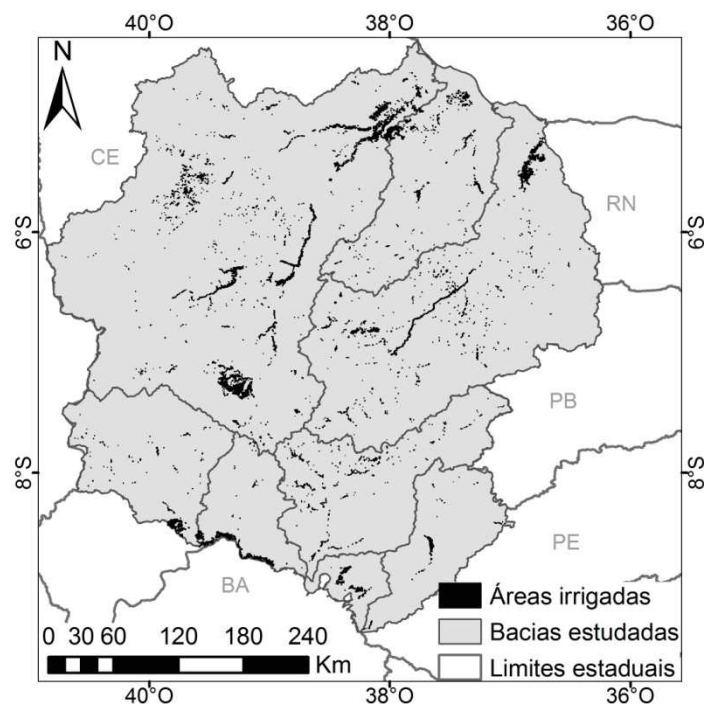


Figura 5. Mapa binário indicando a localização das áreas irrigadas nas bacias hidrográficas estudadas, no ano de 2015, gerado a partir da classificação de série temporal de EVI do sensor MODIS.

Tabela 1. Exatidão global, coeficiente de concordância Kappa e erros de omissão e comissão da classificação de áreas irrigadas utilizando séries temporais de EVI do sensor MODIS na região Nordeste.

Ano	Exatidão global	Coeficiente Kappa	Erros de omissão	Erros de comissão
2006	0,82	0,65	0,10	0,23
2007	0,80	0,60	0,08	0,26
2008	0,86	0,72	0,09	0,18
2009	0,81	0,62	0,13	0,24
2010	0,79	0,58	0,16	0,25
2011	0,80	0,60	0,14	0,24
2012	0,84	0,68	0,08	0,21
2013	0,85	0,71	0,09	0,19
2014	0,83	0,65	0,12	0,21
2015	0,89	0,78	0,06	0,15
Média	0,83	0,66	0,10	0,22

Tabela 2. Área irrigada, em hectares, em cada bacia estudada no período de 2006 a 2015, resultante da classificação de séries temporais de EVI do sensor MODIS.

Ano	Bacias								Total
	Apodi	Brígida	Jaguaribe	Moxotó	Pajeú	Piranhas	GI3	Terra Nova/GI4/GI5	
2006	6.833	9.132	46.289	7.610	7.813	30.845	3.366	9.706	121.593
2007	13.501	8.595	63.239	8.008	11.131	40.830	3.061	10.311	158.676
2008	11.139	9.578	47.647	6.920	9.339	33.098	4.111	11.568	133.398
2009	12.688	10.229	46.699	10.892	18.186	38.882	4.561	12.479	154.616
2010	15.514	6.335	48.856	11.209	11.776	47.741	3.947	9.429	154.806
2011	26.561	9.672	83.119	9.186	16.522	49.210	3.511	9.159	206.941
2012	26.521	9.988	78.638	7.525	8.819	50.766	3.881	11.044	197.181
2013	17.600	8.470	65.898	7.708	8.322	39.359	4.344	10.178	161.881
2014	10.511	9.514	87.299	7.213	10.779	31.825	4.584	10.149	171.873
2015	8.719	7.794	53.161	2.345	5.064	22.301	3.821	7.889	111.094

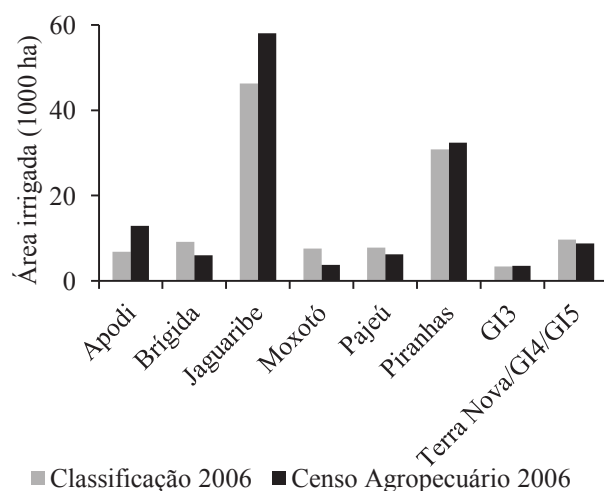


Figura 6. Comparativo da área irrigada de acordo com dados do Censo Agropecuário de 2006 e a área mapeada para o ano de 2006, em cada bacia estudada. Fonte: IBGE (2006).